

氏 名	山 田 啓 司
生 年 月 日	
本 籍	石川県
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博乙第231号
学位授与の日付	平成13年3月22日
学位授与の要件	論文博士 (学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	加工における温度測定と数値解析に関する研究
論文審査委員(主査)	上田 隆司 (工学部・教授)
論文審査委員(副査)	細川 晃 (工学部・助教授) 門前 亮一 (工学部・教授)
	黒部 利次 (工学部・教授) 米山 猛 (工学部・教授)

学 位 論 文 要 旨

ABSTRACT

In this study, the temperatures in laser processing and grinding are discussed, and the characteristics of DLC thin film is also examined. Temperature in machining process is measured by means of two-color pyrometer developed. This non-contact type pyrometer is suitable for measuring the temperature of a very small object whose temperature changes rapidly. Temperature distribution and energy absorptivity of workpiece are calculated numerically using FEM, in laser processings. In the laser forming process, temperature is monitored during the process and the effects of conditions on the deformation of workpiece are clarified. In dental treatment with laser, the thermal damage to hard tissue and pulp of human tooth is also considered. In grinding, the temperatures of the cutting grains and the ground surface are measured, and then the thermal partition coefficients into the grinding wheel, the workpiece and chips are explicated theoretically. Molecular-dynamics simulation is conducted to evaluate the characteristic of a DLC film as a tool coating material.

1. 緒 言

機械工学分野における加工には、研削加工、エネルギー加工、塑性加工など様々な加工法がある。これら加工において熱の発生、温度上昇は大きな影響を及ぼす、重要な問題である。レーザ加工は穴開け、切断、溶接、表面改質などに広く用いられるが、いずれもレーザ光の高エネルギー密度を利用した熱的加工法である。よって、エネルギー加工の中でも温度の測定・制御が不可欠な技術である。本論文では、微小なレーザスポットの急激な温度変化を測定し得る測定システムを構築して、非接触に照射部温度を測定する手法を確立するとともに、シミュレーションによってレーザ吸収率、温度分布を明らかとしている。そして、熱応力を利用した板曲げ加工法、う歯のレーザ照射治療といった温度管理が重要視されるレーザ加工に同手法を応用している。一方、機械加工の分野においても、加工物の精度低下、工具損耗の促進など加工部の温度上昇は大きな影響を及ぼす。そこで、機械加工の中でも温度上昇の激しい研削加工を取り上げ、砥粒切れ刃の温度と加工物温度の測定を行っている。砥石、加工物と切りくず間の熱伝導シミュレーション結果と温度測定結果から熱の分配率を求めている。また、MDシミュレーションにも取り組み、耐摩耗性・熱拡散性を有す工具コーティング材として期待される DLC 薄膜材料の硬度について検討している。

2. 温度測定システム

短時間に变化する微小領域の温度を測定するために、図1に示す3種類の非接触式温度計を製作して用いた。これら温度計は、いずれも光ファイバと赤外線検出素子から構成されている。図1(a)に示す輻射温度計は、測定対象面からの輻射赤外線をファイバで受光し、素子へと伝送して受光エネルギーから測定部の温度を求めている。光ファイバを用いることで微小部分の温度を測定することができ、ファイバを挿入する孔を設けることで物体内部の温度測定も可能であり、本論文では研削加工における砥粒切れ刃および加工物の温度測定に用いている。図1(b)に示す2色温度計は、光カプラを用いて赤外線を2種類の検出素子に分配する構造となっている。図1(c)の2色温度計は2種類の層を積層した素子を用いており、表層と下層は異なる分光感度を有している。これら2色温度計は二つの素子出力の比から測定対象面の温度を求めている。そのため、対象面の輻射率変動の影響を受けず（図2）、大きな測定距離をもって設置が可能である。これら2色温度計はレーザ加工時の温度測定に適用している。また、いずれの温度計に用いた増幅回路も約100kHzまでの帯域で十分な利得が得

られており、本論文で行う温度測定に十分な周波数応答性を有している。

3. レーザ光照射時のフラッシュ温度

レーザ光を遮らない位置に光ファイバを設置するために、測定距離が大きくなってしまうので、2色温度計を用いて温度測定を行う。2色温度計は、測定対象面の輻射率の影響を受けることなく測定可能である。したがって、レーザ照射部のように非常に高温となり、熔融などをともなう温度を測定するのに有効である。また、加工物内部の温度分布の詳細を明らかとし、レーザ光吸収率を求めるために、FEMシミュレーションを行った。レーザ光のエネルギー密度はガウス分布をしているため、図3に示すように軸対称となるFEMモデルを用い、熱物性値および輻射率は温度依存性を考慮している。レーザ光吸収率をパラメータとして求めたシミュレーション結果と実験結果の比較から、加工物の吸収率を求めることができる。

図4は、実験とシミュレーションによって求めたレーザ光照射部の温度履歴の一例である。測定波形とシミュレーション結果とはよく一致しており、求めた吸収率が妥当であることが確かめられる。図5に示すように、PSZの吸収率は、常温において約50%から2100

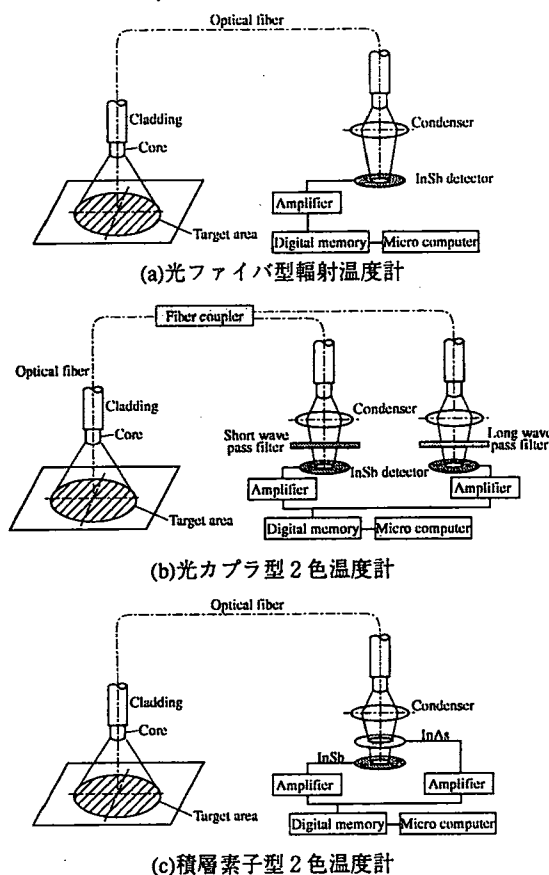


図1 温度計概略

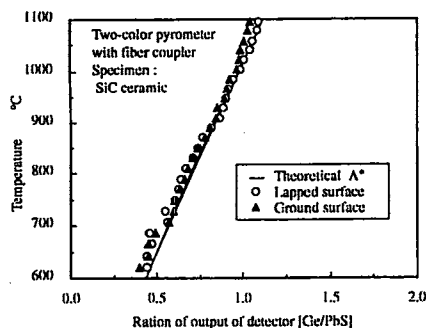


図2 2色温度計における輻射率の影響

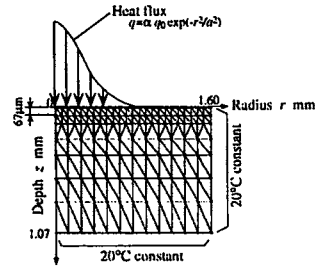


図3 レーザ光照射部のFEMシミュレーションモデル

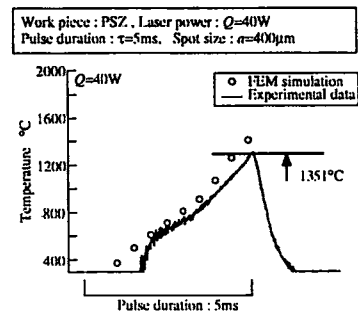


図4 レーザ光照射部の温度履歴

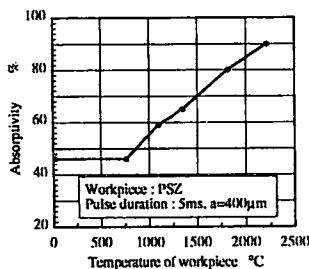


図5 レーザ光吸収率の温度依存性

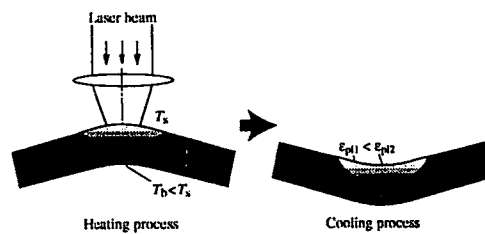


図6 レーザフォーミングの原理

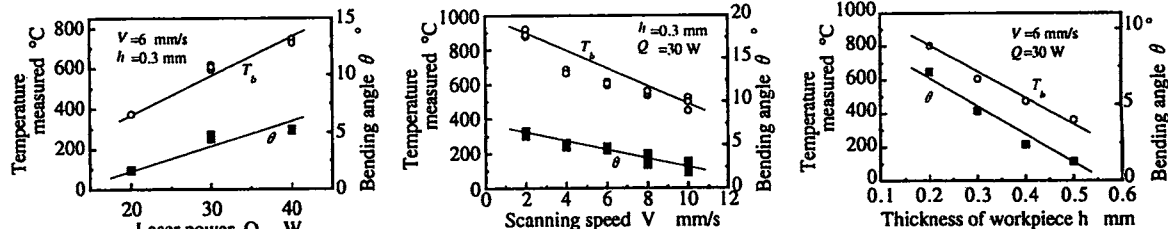


図7 レーザフォーミング加工における加工条件の影響

℃では約90%と大きく変動している。

4. レーザフォーミングにおける加工物温度

前述の測定法を応用して、ステンレス板材のレーザフォーミング加工（図6）における温度を測定している。実験から加工条件と加工物温度や変形角の関係を明らかにするとともに、熱伝導FEMシミュレーションによって各種加工条件が加工物温度分布に及ぼす影響を調べている。

レーザ光を一定速度で走査してステンレス板材を曲げ加工した場合の加工条件と加工物温度、変形角度の実験結果を図7に示す。レーザ出力、レーザ走査速度、板厚の条件を変化させていずれの場合でも、加工物温度が上昇するにつれて変形角度が大きくなることがわかる。その結果、加工部温度を監視し、加工条件を制御することで温度調整を行えば、変形角を制御可能である。

5. レーザ歯科治療における温度

レーザによる歯の治療は、非接触であるために感染症の予防、患部の殺菌効果、振動や音の低減などの効果があるが、照射部からの熱伝導による周囲硬組織や内部の歯髄への影響

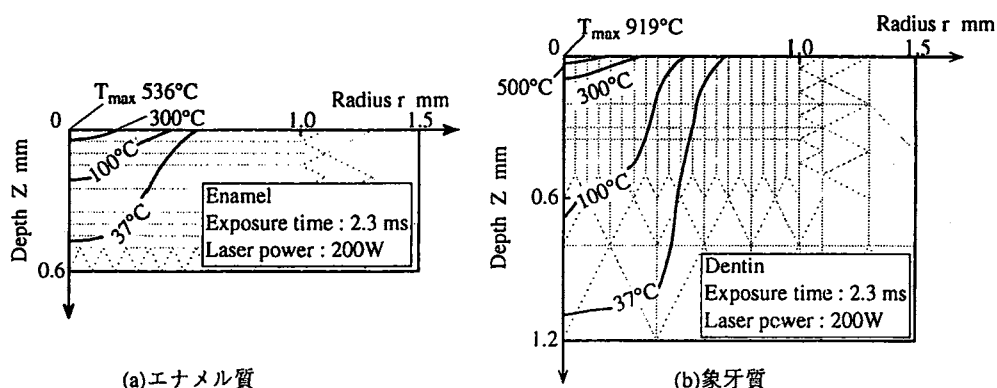


図8 ヒト歯硬組織内部温度分布 (Nd:YAG, 2.3 ms)

が心配される。そこで、レーザ歯科治療における歯硬組織や歯髄への熱影響を検討するため、YAGレーザによるヒト歯硬組織の除去加工温度を測定し、歯組織内部の温度をFEMシミュレーションで求めた。シミュレーションに際しては、実験により求めた歯組織のレーザ光に対する吸収係数（エナメル質で 3.43mm^{-1} 、象牙質で 1.68mm^{-1} ）を考慮して、内部組織にまで透過光によるエネルギーが与えられると考えている。

図8が内部温度分布図で、エナメル質では表面から0.5mmの深さでほぼ体温となり、象牙質ではおよそ1.0mmの深さまで温度上昇している。

6. 研削加工における温度測定と解析

図9に示すように光ファイバ型輻射温度計を用いて、砥石寿命に大きく影響する砥粒切れ刃の温度、および加工精度を左右する加工物温度の測定を行う。さらに砥石、加工物と切りくず間の熱伝導シミュレーション結果と測定結果から熱の分配率を求めている。図10に示すように材料によって加工物温度は変化し、SUS304で 1090°C 、S55Cが 950°C 、FC20は 890°C であった。セラミックスを研削した場合の加工物温度は鋼材に比べて低く、砥石への熱分配率が大きくなった。また熱伝導率の大きいダイヤモンド砥石とWA砥石とを比較した実験では、加工物表面で 700°C 以上の温度差が生じ、加工物への熱分配率はWA砥石の場合の95.5%に対し、ダイヤモンド砥石では51.1%と大きく異なった。

7. MDシミュレーションによるDLC薄膜の解析

耐摩耗性・熱拡散性を有す工具コーティング材として期待されるDLC薄膜材料の硬度について検討している。 Tersoffポテンシャルを適用した炭素原子でDLC薄膜を構成したシミュレーション結果は、硬度の異方性、速度依存性を示し、超微小硬度計による実験とよく一致した。また、基板材質の影響を受けることなく実測することが不可能なDLC薄膜の硬度をMDシミュレーションの適用によって求めることができた。

8. 結 言

本論文では、加工における温度を測定するとともに、シミュレーションによって各種加工の重要なパラメータを求めた。微小領域の急速な温度変化を非接触で測定できる輻射温度計および2色温度計を製作した。

温度計をレーザ加工温度測定へ適用し、フラッシュ温度と呼ばれる、レーザ照射時の極短時間の照射部温度上昇の測定手法を確立した。FEMシミュレーションによって、照射面お

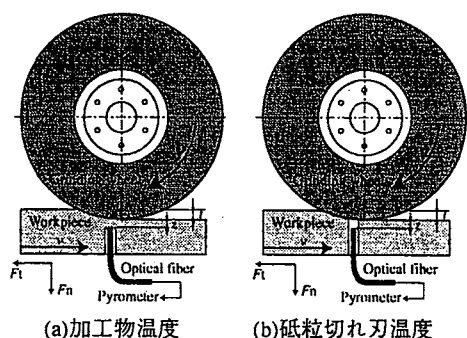


図9 研削加工温度測定実験

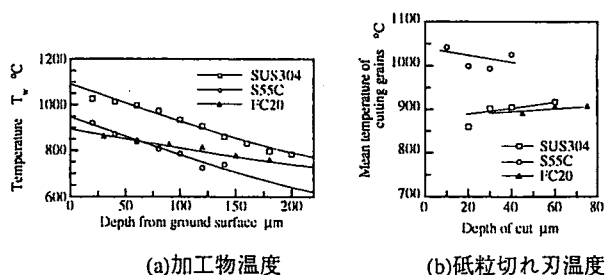


図10 研削加工温度 [鋼材, A 砥石]

よび内部の温度分布, レーザ光吸収率の温度依存性を求め, 2色温度計によって照射部の数msの温度変化が精度よく測定されていることを検証した. そして, 同測定法・シミュレーション手法のレーザ加工への応用として, フォーミング加工実験, う歯治療実験を行った. フォーミング加工実験においては, 加工部温度を監視し, 加工条件を制御することで温度調整を行えば, 変形角を精度よく制御可能であることを示した. またう歯治療実験においては照射部の温度が600℃にも達することを明らかとし, レーザ光透過率を考慮した温度分布解析から組織内部の歯髄への熱影響について検証した.

同測定法の機械加工への適用として, 温度上昇の激しい乾式研削を取り上げた. 砥粒切れ刃と加工物の温度測定に同温度計を適用しており, 砥石, 加工物と切りくず間の熱伝導シミュレーションから熱の分配率を求めた. 被削性によって加工物温度は変化することを示し, 3者への熱分配率を明らかとした. また, 熱伝導率の異なる2種類の砥粒を用いた砥石への熱流入割合は大きく異なった.

最後に, 今後有用な解析手段となると考えられるMDシミュレーションに取り組み, 耐摩耗性・熱拡散性を有す工具コーティング材として期待されるDLC薄膜材料の硬度について検討した. Tersoffポテンシャルを適用した炭素原子を用いてアモルファス状DLC薄膜を構成することで薄膜の性質をシミュレーションによって評価できることを示した.

学位論文審査結果の要旨

平成13年1月16日に第1回学位論文審査委員会を開催し、平成13年2月1日に口頭発表ならびに第2回審査委員会を開催して慎重に審査した結果、以下のように判定した。

研究歴および学力：申請者は平成4年金沢大学大学院工学研究科精密工学専攻を修了し、現在金沢大学工学部機能機械工学科助手の職にある。その研究歴は約8年であり、国内国外の学会誌に掲載された多数の論文、及び口頭発表時の質疑応答の内容を評価した結果、博士課程修了者と同等以上の学力を有するものと判定した。

論文：本論文は機械加工として研削加工、エネルギー加工としてレーザ加工を取り上げ、これらの加工特性を温度の観点から実験的・理論的に検討している。研削加工において、高速で移動する砥粒切れ刃の温度と加工物温度を測定し、砥石・加工物・切り屑間の熱伝導シミュレーションから熱の分配率を求めている。レーザ照射時の極短時間に上昇する温度を測定する方法を確立し、FEMシミュレーションによって求めた温度分布との比較により、温度に依存して変化するレーザ光吸収率を精度良く求めている。また、板材を熱応力によって変形するレーザフォーミングをとりあげ、温度を監視信号として加工条件を制御するシステムを考案し、精度良く変形角を制御できることを示している。さらに、歯のレーザ治療において、歯髄が熱によって壊死する恐れに対し、口中の歯のレーザ温度を計測する方法を確立することによって安全なレーザ治療に道を開いている。

以上のように、本論文は精密加工に不可欠な加工温度に関する研究を幅広く行い、多くの新しい知見を得ており、博士(工学)論文に値するものと判定した。